ChinaXiv合作期刊

地球之外的冰雪世界
——行星冰冻圈研究综述

胡永云* 杨 军 魏 强
北京大学 物理学院 大气与海洋科学系 北京 100871

chinaXiv:202303.08999v1

摘要 文章介绍了太阳系和太阳系外行星冰冻圈。太阳系各行星和卫星的表面温度差异很大，它们的冰冻圈发育各不相同。水星和月球的两极陨石坑的永久阴影区中可能有水冰存在。金星太热，表面既没有液态水，也不可能有水冰存在。火星两极存在永久性冰帽，包括水冰和干冰（固态 CO_2）。在太阳系雪线之外，存在很多冰卫星和富含水的矮行星，它们的主要是由水冰组成的；在极低的温度下，水冰甚至比地球上的岩石还要坚硬，并成为这些星体的壳层。除了水冰，其他易挥发组分如 CO_2、CH_4、N_2、CO 等在极低温度下都会凝固为冰，形成不同于水冰的冰冻圈。因此，行星冰冻圈具有与地球冰冻圈迥然不同的丰富多样性。对行星冰冻圈的研究有助于我们扩大视野，更深入地理解地球冰冻圈，也将有助于我们理解太阳系的形成、地球水分的来源、地球深时古气候环境和生命演化，以及开展未来的系外生命探测。

关键词 冰冻圈，太阳系行星，系外行星，行星科学，气候

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20200328001

在现代气候条件下，地球冰冻圈主要存在于高纬度、高海拔和大气对流层中层至中间层[1]。但在地球 46 亿年的历史中，地球气候经历了剧烈的冷暖变化，因此地球冰冻圈的范围也在不断地波动。在暖期，地球的两极甚至没有冰盖；而在极端寒冷期，冰冻圈推进到赤道附近，地球甚至进入了全冰封的状态。如果我们把视野放大到整个太阳系，各行星的冰冻圈所展示的丰富多样性远超出了我们基于地球所形成的冰冻圈概念。由于各行星和卫星的表面气压、温度与地球存在巨大的差异，它们的冰冻圈与地球冰冻圈有着很大的不同。特别地，行星冰冻圈还包括其他易挥发组分的冰冻圈层[2]。例如，在火星极低的温度条件下，二氧化碳（CO_2）能够形成干冰并沉降；氮气（N_2）在冥王星上可以形成氮冰等。在太阳系的外围，一些矮行星和卫星主要是由水分组成的，这些天体的壳层是由冰冻圈组成的；在极低的温度条件下，

* 通讯作者
资助项目：国家自然科学基金（41761144072、41888101）
修改稿收到日期：2020年3月28日

这些矮行星和卫星的水冰物理性质与地球上的水冰完全不同。在太阳系之外，目前已发现了 4 000 多颗系外行星，其中 10—20 颗有可能是适宜类地生命存在的宜居行星。这些太阳系外宜居行星大多是潮汐锁相行星——其一面永远朝向其恒星，而另一面永远背向恒星。可以想象，这些行星背阳面的冰冻圈与地球冰冻圈应该有着很大的差异。

在本文中，我们首先简要介绍地球历史上的主要冰河期，然后介绍太阳系行星冰冻圈，最后介绍太阳系外宜居行星的冰冻圈。

1 两次“冰雪地球”事件

回顾地球 46 亿年的历史，气候的总体趋势是不断变冷的。自地球形成到距今 25 亿年前，除去大约距今 30 亿年前可能存在一段较短的寒冷时期外，地球上基本没有冰河期存在；并且，这段时间内地球两极地区很可能也没有冰盖，地球冰冻圈很可能仅存在于大气层，也就是冰晶云。早期地球的平均表面温度较现在高得多，氧、硅同位素等其他地质证据也支持这一结论[2]。

距今 25 亿年以来，地球上出现过 5 次大的冰河期，其中 2 次为全球性的，分别发生在距今 23 亿年前的古元古代和距今 8 亿—6 亿年前的新元古代。当这 2 次冰河期达到巅峰时，全球平均温度降低到 −50℃ 或更低，陆地被冰川所覆盖，海冰厚度达 1—2 km，并且延伸到赤道地区，甚至赤道地区的海洋也被冰封，地球冰冻圈范围扩展到最大。这 2 次全球性的冰河期也被称为“冰雪地球”（Snowball Earth）。当全球海洋被冰封之后，水循环基本被切断，不会再产生降雪，而最初的积雪逐渐形成冰；此时，地球实际上是被冰所覆盖，因此称为“冰球地球”更合适一些[3,4]。

这 2 次全球性冰川的证据主要来自 3 个方面：① 在现代，所有大陆上均发现了对应这 2 个时期的冰川残迹层。根据古地磁的证据可以推测出当时的大陆基本都集中在热带地区，这说明当时赤道地区大陆也存在冰川。② 2 个时期都有条带型铁矿石的形成，这说明在条带型铁矿石形成之前海洋曾经被完全冰封过。只有在海洋完全被冰封的情况下，海洋中氧的来源被切断，在无氧状态下，铁溶解于海水的现象才能发生（在无氧的情况下，铁是可以溶解于水的）；而当海冰融化后，大气中的氧进入海洋，铁与氧发生化学反应形成氧化铁，从海水中沉淀下来，并形成条带型的铁矿石。③ 冰川残积层上面存在深厚的碳酸盐岩。这说明在冰川期期间，陆地表面硅酸盐风化反应被停止或极大地削弱，火山喷发的 CO_2 不断在大气中累积；当冰川消融后，大气中 CO_2 通过风化反应形成碳酸钙，并沉降下来。

古元古代冰河期（也被称为休伦冰河期）有可能是地球历史上持续时间最长的冰川期。关于古元古代“冰雪地球”的形成，一般认为与大气中甲烷（CH_4）的氧化有关。那时大气的氧气（O_2）开始不断累积和升高；氧化反应使得大气中CH_4浓度降低，温室效应减弱；继而地球变冷，从而诱发了古元古代“冰雪地球”的形成。

新元古代“冰雪地球”事件包括了至少 3—4 次全球性冰川的形成和融化过程，其中至少有 2 次冰川事件是全球性的。新元古代“冰雪地球”的形成和融化与 CO_2 浓度的变化有关，是一个典型的碳酸盐-硅酸盐循环气候负反馈机制的结果。新元古代“冰雪地球”形成和融化分为 4 个阶段：① 热带裸露的地表导致强的风化反应，CO_2 浓度降低，温室效应减弱；② 在冰雪-反照率正反馈的作用下，陆地冰川和海冰自高纬度向热带扩张，形成全球性冰封；③ 冰封后，风化反应中断，火山喷发的 CO_2 在大气中累积，温室效应增强；④ 当 CO_2 浓度足够高，温室效应变得足够强，“冰雪地球”融化，地球返回温和的气候态。整个过程正好代表了 1 次碳酸盐-硅酸盐循环，也反映了该

chinaXiv:202303.08999v1

ChinaXiv合作期刊

循环的负反馈机制对气候稳定性的作用。与古元古代“冰雪地球”的形成不同，新元古代“冰雪地球”的形成是由于CO_2浓度降低，而非CH_4浓度降低。2次全球性冰川的融化则都是由于CO_2浓度升高所导致的温室效应变强造成的。

这2次“冰雪地球”事件对传统的地球深时古气候变化和生命演化是一个极大的挑战[3,4]。迄今为止，地学界关于这2次全球性冰川事件还存在广泛的争论。争论的要点为海洋究竟是完全被冰封，还是热带海洋仍保留有开放的海域。虽然所有的证据都表明在元古代的早期和晚期确实出现过地球历史上最为严重的冰河期，但这些证据还不能充分证明地球在这2个时期被完全冰封过。就现有的证据而言，热带保留开放的洋面似乎更合理一些。如果地球确实被完全冰封数百万年，原始生命如何延续将是一个很难回答的问题。

2 太阳系行星冰冻圈

2.1 太阳系雪线

相对于太阳系其他行星和卫星的冰冻圈而言，地球冰冻圈仅是冰山一角。与高海拔的山峰具有雪线一样，太阳系也有一条雪线，距离太阳大约2.7 AU①，位于火星和木星之间（图1中的白色线）。在太阳系雪线之内有4颗固态行星，分别是水星、金星、地球和火星；而在太阳系雪线之外是4颗气态行星，分别是木星、土星、海王星和天王星[5]。在太阳系雪线的内侧，水冰不可能在太阳直射下永久存在，很容易挥发成为水汽。而在太阳系雪线外围，星体温度已非常低；根据克劳修斯-克拉伯龙方程，水冰表面已很难挥发，因此，水冰是可以永久存在的，并在地质时间尺度上保持稳定状态[6]。在太阳系雪线之外，除了4个气态巨行星，还拥有大量的矮行星、小行星和固态卫星，而它们都包含大量的水冰。实际上，一些卫星的壳层主要是由水冰组成的，通常被称为冰卫星。观测表明，多个冰卫星还拥有丰富的地质活动，如冰壳裂解、下层水汽等物质向外喷发等，这些极大地拓展了冰冻圈的外延。因此，就整个太阳系来说，冰冻圈的概念是丰富多彩的。

行星冰冻圈的研究对于理解和寻找生命起源，以及研究地球和其他行星的气候演变有着重要价值，也有为未来行星探测器乃至星际定居点提供重要的能量和物质来源的潜力。

2.2 火星冰冻圈

在太阳系雪线内侧，4颗固态行星在太阳系形成之初就是贫水的，因此它们冰冻圈的范围普遍较小。水星由于质量太小而无法维持显著的大气层，地球的卫星——月球也如此。二者表面能够被太阳直射的部分都不可能有水冰存在，因为在太阳光照射下，冰将很快升华并逃逸到太空。关于水星和月球两极陨石坑内永久阴影区中是否存在水冰的争论，持续了整个20世纪。直到最近几年，“信使号”探测器和“嫦娥”系列探月卫星为我们提供了越来越多的证据，显示水星和月球极区陨石坑内的永久阴影区中存在有少

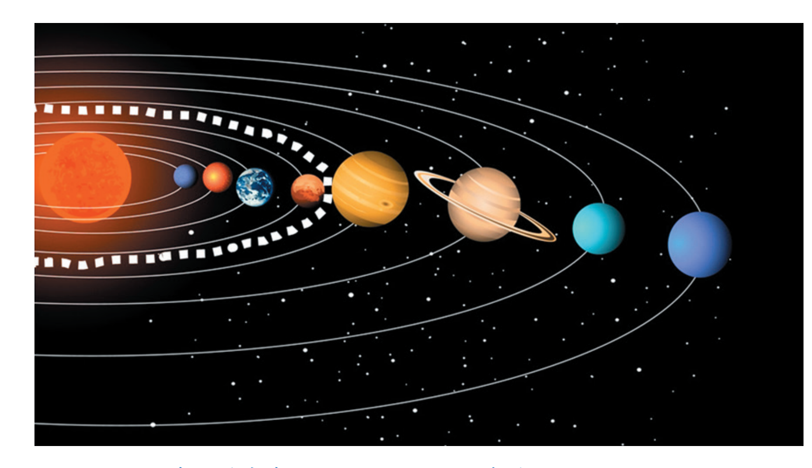


图1 太阳系中太阳、八大行星和雪线的位置
从左到右的星球依次为：太阳、水星、金星、地球、火星、木星、土星、海王星和天王星；火星与木星之间的白色虚线为雪线

① 天文单位（AU），其数值取地球和太阳之间的平均距离；1天文单位=1.495978707×10^{11}米。

chinaXiv:202303.08999v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.08999v1

量的水冰[7,8]。金星由于其大气温室效应太强，近地面气温接近500℃，地表不可能存在水或者冰。

火星曾是人类寻找液态水的首选。火星全球平均温度低于−60℃，其极区冬季温度低于−150℃。尽管一些地貌特征和沉积物显示，火星在30亿年前可能曾经存在丰富的液态水甚至海洋，但现在，火星中低纬度地区表面没有发现水冰，中低纬度地区的次表层是否存在冻土或水冰还不太清楚。火星南、北两极的冰帽是火星冰冻圈的主体（图2）[9]。火星北极冰帽较大，直径约为1 100 km，厚度2—3 km，整个冰帽的体积约为 1.9×10^6 km^3，与格陵兰冰盖的体积（2.85×10^6 km^3）接近；南极冰帽较小，直径约为400 km，冰盖厚度与北极冰帽相当。火星两极冰帽都由水冰和干冰（固态 CO_2）组成，相对来讲，北极冰帽水冰较多，而南极冰帽则以干冰为主。火星两极冰帽均存在季节性变化，主要是由干冰的季节变化造成的：火星两极的冬季温度均低于 CO_2 凝固的温度。因此，在冬季火星大气中的 CO_2 在两极地区冻结并沉降，形成干冰。在夏季，火星北极温度可高达−68℃，超过了 CO_2 的升华温度，因此其地表干冰升华进入大气层。相对而言，火星南极夏季温度很少超出−125℃，因此干冰不易升华。这造成了火星南北两极冰帽成分的差异。这里特别需要指出的是，火星的冰冻圈已不仅仅涉及水冰，还包括干冰。因此，行星冰冻圈不仅包含水分的冰冻圈，其他大气成分的凝固也是行星冰冻圈的一部分。

2.3 谷神星冰冻圈

谷神星是位于小行星带的最大星体，属于矮行星范畴，距离太阳2.8 AU，介于火星和木星之间，直径940 km。现有的研究和探测表明，谷神星的壳层厚度约为40 km，含有至少40%的水冰，其他是岩石成分。2015年，美国国家航空航天局（NASA）的“黎明号”探测器表明，谷神星表面为水冰、盐和水合矿物的混合物，可能还有水合包络物。另外，在谷神星上还发现了冰火山[10]。阿胡拉山（Ahuna Mons）便是一个较为确定的冰火山，约17 km宽，4 km高（图3）；其就是水冰从壳层下面喷发出来形成的冰山[10]。

除了谷神星，小行星带内的许多小星体也主要是由水冰所组成。一些研究建议，地球水分中的相当一部分是在晚期大轰击时期（距今42亿—38亿年前），由小行星带内富含水的星体撞击地球带来的。因此，研究地球之外的冰冻圈对我们理解地球水的来源和生

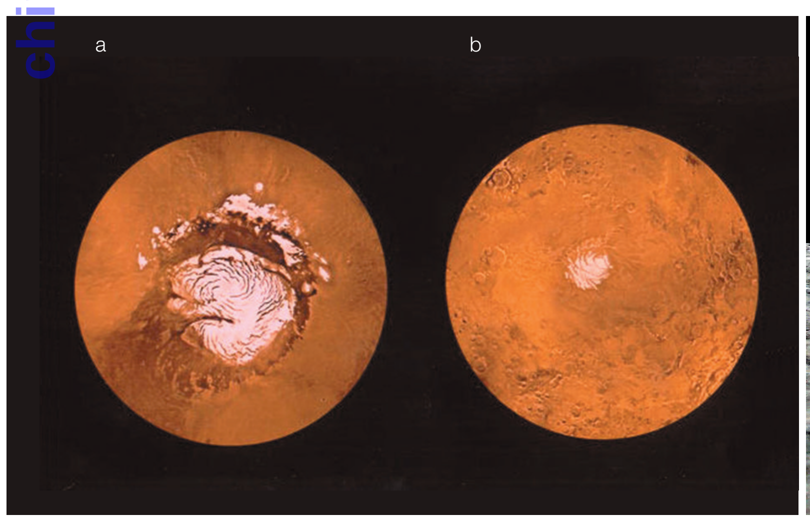


图2　火星南北两极地区永久冰帽图像

（a）北极冰帽；（b）体积相对较小的南极冰帽；资料来源：NASA/JPL/USGS

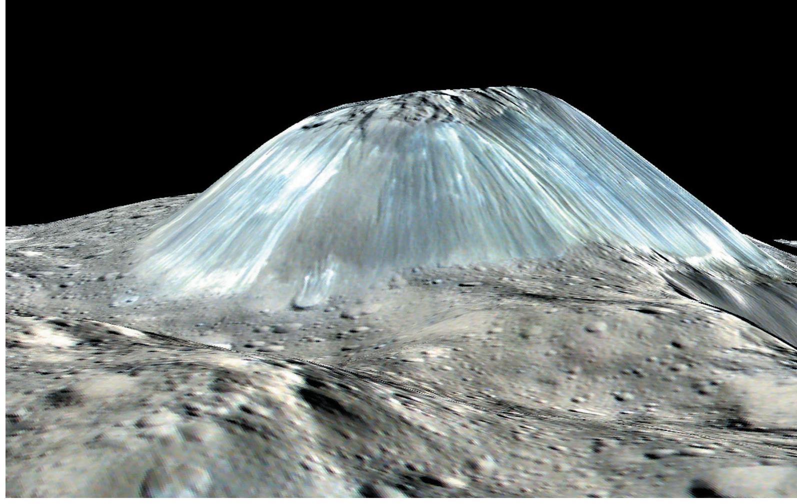


图3　谷神星上的阿胡拉冰火山

资料来源：NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA（https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA21906）

ChinaXiv合作期刊

命演化极为重要。

2.4 冰卫星

木星和土星是2颗气态巨行星，拥有诸多卫星，而这些卫星中许多是由水冰组成的；此外，土星美丽的光环也主要是由水冰颗粒组成的。

水冰覆盖了木卫二（Europa）、木卫三（Ganymede）和木卫四（Callisto）的表面并成为这些卫星的壳层。这些壳层与由岩石物质所构成的地球壳层完全不同。在这些卫星的水冰壳层之下，很可能存在着液态海洋。因为液态水是生命存在的首要条件，所以木卫二受到了最广泛的关注。20世纪70年代发射的“旅行者号”探测器拍下的大量照片显示，木卫二的水冰表面布满了纵横交错的山脊—山谷—山脊状裂纹。此外，还有约占表面积1/4的冰川表面“破裂”为数千米大小的破碎多边形单元，显示在引力潮汐作用下，木卫二壳层下液体流动的痕迹。根据这些观测，很多科学家相信木卫二的水冰壳层下存在一个较深厚的海洋。重力场测量表明木卫二外圈冰层和可能的地下海洋总深度达到约100—200 km[11]。

土星的冰卫星与木星的冰卫星类似。以土卫二为例，其密度约为1 600 kg · m^{-3}，对应着约60%的岩石和40%的水/冰，其表层是一层水冰壳层，而壳层下可能存在一个全球性的海洋。土卫二有着令我们始料未及的地质活动强度：年轻的南极冰壳层有4条平行的裂纹——“老虎纹”（tiger stripe），不断喷发出超音速冰粒、水蒸气和其他气体，达到几百公里的高度（图4）。喷发物大部分落回土卫二表面，而约有9%的物质在土星引力作用下，成为壮观的土星环的一部分（E环）。土星美丽的光环也主要是由水冰颗粒所组成。“卡西尼号”飞船多次穿越后测得其气体成分主要是水汽，还含有5% CO_2、1% CH_4、1%氨（NH_3），以及少量较重的碳氢和有机化合物[12]。地球生命所必需的三大条件包括生命所需的元素、液态水和化学能来源（氧化还原梯度），而前两者几乎都能够在土卫二上找到。这使土卫二成为天体生物学研究，特别是成为寻找生命起源的一个重要研究目标。

土卫六又称“泰坦”，是太阳系中唯一拥有浓密大气的卫星。大气中的CH_4和N_2发生光化学反应，生成高阶碳氢化合物和腈类物质，形成的有机气溶胶颗粒成为土卫六大气中的霾。“卡西尼号”飞船通过雷达发现在土卫六不到100 K表面温度下存在一系列的CH_4湖，小的不到10 km^3，最大的克拉肯

chinaXiv:202303.08999v1

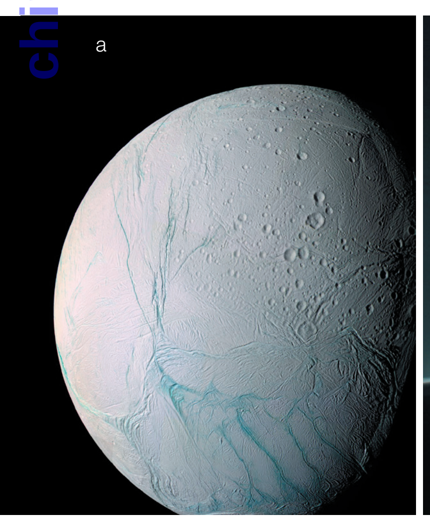




图4 “卡西尼号”飞船拍摄的土卫二照片

（a）伪彩色图，显示土卫二全球均被水冰冰壳所覆盖；其中，右上方可见较为密集的陨石坑，下方4条平行的淡蓝色条纹是南极区域的“老虎纹”，也是“喷泉”喷发的位置；（b）土卫二南极“老虎纹”所喷出的气体和固体喷泉；资料来源：NASA PIA07800，PIA11688

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.08999v1

海达到 500 000 km^3[13,14]。土卫六是目前已知的地球之外唯一在表面拥有稳定的大面积的液体存在的天体。CH_4 在土卫六的角色与水在地球的作用很相似，CH_4 湖的存在维持了大气层中的 CH_4 含量，同时产生了 CH_4 云；地面有着纵横交错的河流痕迹，表明土卫六上可能有间断发生的液态 CH_4 沉降。此外，“卡西尼号”飞船所投放的“惠更斯号”探测器在土卫六的着陆点附近还拍摄到许多鹅卵石大小的、可能包裹了碳氢化合物的水冰。

2.5 冥王星

在太阳系外侧的柯伊伯带有众多小星体[15]，这些小星体主要由水冰组成。冥王星是其中最大的一个星体，属于矮行星范畴，其壳层主要由水冰构成。冥王星表面温度 30—60 K，在如此低的温度条件下，N_2、CH_4 和一氧化碳（CO）等易挥发物质都以固态冰的形式存在，并与一些光化学产生的有机物一起覆盖在由水冰构成的“基岩”上。这些易挥发性冰的厚度和成分比例随温度变化呈现显著的变化。与土卫六类似，冥王星的冰冻圈也是与大气圈密切耦合在一起的，其大气压力由氮冰的饱和蒸气压所控制：在远日点时，冥王星表面温度较低，大气压也较低；而在近日点时，表面温度较高，N_2、CH_4 和 CO 挥发进入大气，大气压也随之升高[16]。

“新视野号”探测器在飞越冥王星时拍摄的照片显示，冥王星有一个“心脏形”的平原，被称为“斯普尼克平原”。该平原是一个盆地，四周都是水冰形成的冰山，高度 2—3 km，还发现了冰火山的活动痕迹（图 5）。该平原上覆盖着数千米厚的易挥发冰层，主要成分是 N_2，还有少量 CH_4 和 CO。观测表明，这层氮冰能够进行固体对流运动，还能够通过黏性流动不断更新其表面[17]。

3 太阳系外行星冰冻圈

1995 年，第一颗围绕类太阳恒星公转的太阳系外行星（简称“系外行星”）被确认。这是一个划时代的事件，其发现者 Michel Mayor 和 Didier Queloz 获得了 2019 年的诺贝尔物理学奖。在 1995 年之后，每年累计确认的系外行星数目呈指数增加，目前已经确认了 4 000 多颗系外行星。其中，有 10—20 颗可能是宜居行星[18]。一颗行星是否宜居取决于诸多条件，如地表水、恒星辐射、行星轨道、大气成分、臭氧层、板块构造、磁场等，但液态水是生命存在的首要条件。行星的地表是否能够长期维持液态水的存在，主要取决于地表温度。如果一颗行星上的水常年都以固态的形式存在，完全被冻结，那么这类行星肯定是不宜居的。

在系外行星中，最有可能出现冰冻圈的是围绕着红矮星公转的行星[18]。红矮星质量较小、大约只有太阳的 7.5%—60%，其辐射温度较低，大约在 2 300—3 800 K。相对而言，太阳的表面温度是 5 800 K。因为红矮星的质量较小，其核聚变反应速率比太阳的慢很多，其寿命也较类太阳恒星要长很多，所以银河系中 80% 以上的恒星是红矮星，而类太阳恒星或质量更大的恒星数量很少。目前，已发现的大部分系外行星是围绕着红矮星公转的。因为红矮星的辐射强度比太阳的小很多，所以其周围的宜居行星与母星距离较近，受到恒星的潮汐力很大，形成潮汐锁相。这些宜居行星的一面永远拥有阳光，另一面永远处于黑暗之中。月球就是被地球锁相；因此，我们只能看到月球的一面，而无法看到月球的另一面。

潮汐锁相行星的大气环流与地球的非常不同。它们的大气环流在朝阳面辐合上升，在背阳面辐合下沉，再通过边界层回到向阳面。这种大气环流可以将水汽和热空气从向阳面输送到背阳面，同时将冷空气从背阳面输送到向阳面。背阳面因为永远接收不到恒星辐射，温度很低，海洋有可能被冻结，水汽将凝结成冰雪，沉降到地表，并形成冰盖[19]。因此，潮汐锁相行星背阳面是冰冻圈的发育区。

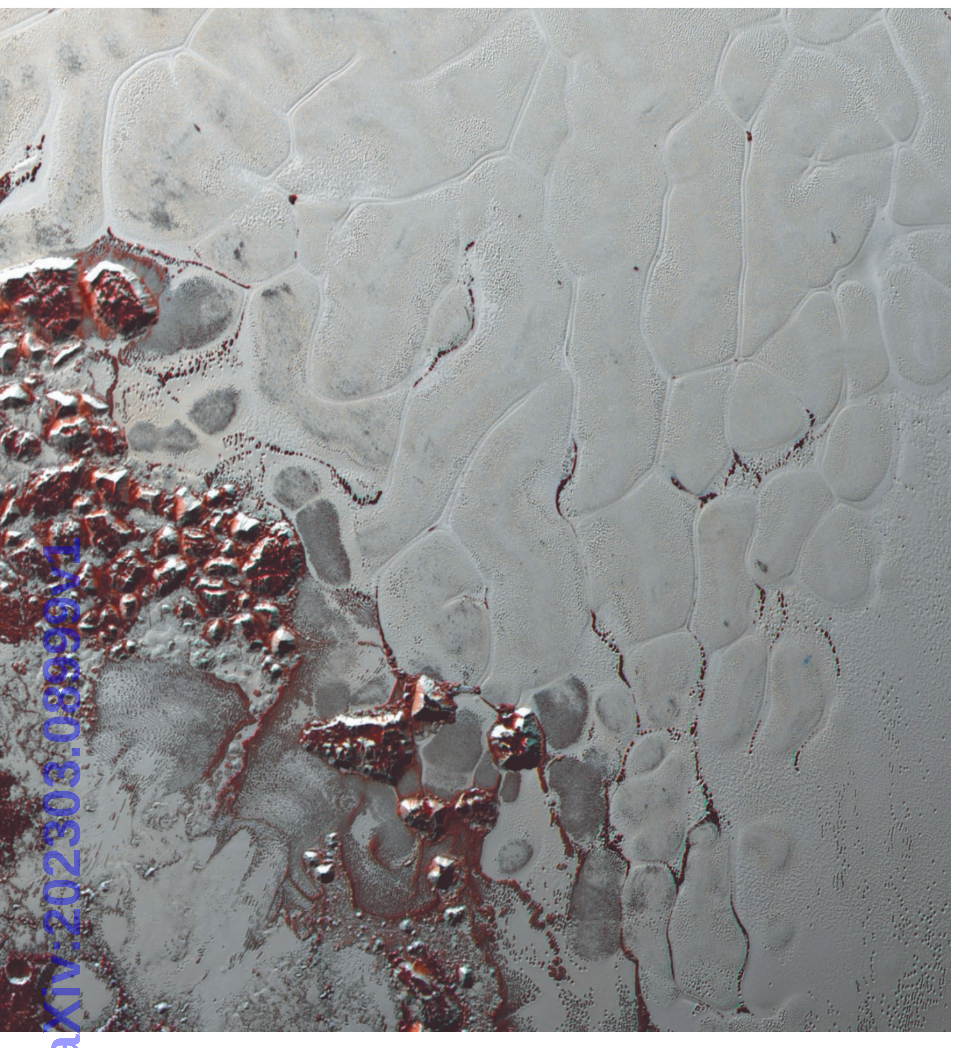


图 5 “新视野号”探测器拍摄的冥王星斯普尼克平原上的氮冰川照片
画面的实际尺寸约 400 km；多边形的长宽大约 30 km 左右，是由于氮冰川在地热作用下对流运动造成的；图的左下侧，棕色的山峰高度约 2—3 km，是由水冰组成的；图中的小麻点，尺度约几百米，是由于一些低反照率物质造成的氮冰挥发形成的“坑洞”；资料来源：http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA20726

潮汐锁相行星背阳面冰川的厚度取决于诸多因素。首要因素是冰川底部地热通量的强度，地热通量越大，冰川越不容易变厚，被冻结在背阳面的水分就越少[19]。其次，在重力作用下，背阳面冰川会发生自背阳面向朝阳面的流动，当冰川流回到朝阳面时，将被融化，形成湖泊或者海洋。如果行星的水分较少，水分很容易被冻结在背阳面，那么此类行星是不宜居的。如果行星的水分足够多，即使部分水分被冻结在背阳面，但朝阳面仍将保留海洋，因此将是宜居的。海洋环流也可以将热量从向阳面输送到背阳面，有效地加热背阳面，使得背阳面冰川和海冰的厚度不至于太厚。

图 6 是使用海-气耦合气候模式和冰川模式模拟的锁相行星背阳面陆地上的冰川厚度[20]。在该模拟试验中，锁相行星的地热通量和重力加速度均与地球的相同，背阳面冰盖厚度最大可达到 2 km，冰川移动最大速度是每年 1.0 m。以地球的海洋平均深度 4 km 为例，如果一颗锁相行星背阳面的冰盖厚度为 2 km，其朝阳面还应该有 2 km 深的海洋。但如果整个海洋深度较浅，则很可能朝阳面没有液态水存在，该行星将是非宜居的。

4 结语

本文简要介绍了地球早期的 2 次“冰雪地球”事件和行星冰冻圈。有 2 点需要特别强调：① 在不同温度条件下，其他星体上的水冰物理特征与地球上水冰迥然不同；② 在极低温度条件下，易挥发分物质在其他星体上也可以形成冰冻圈，这在地球上是很难想象的。由于篇幅的关系，我们并没有详述其中的基本物理原理。实际上，任何一种物质的相态是温度和压力的函数，其中任何一个条件或两者的共同改变，都可以产生不同的相态。在高温高压下，水变成一种超级流体。在低温低压下，水冰坚硬无比，可以是星体的壳层。另一个例子是，在我们通常的概念中，氢（H_2）是一种气体，但在高压下，H_2 具有金属的特征，甚至可以导电。人们甚至认为，在木星的核心，由于大气压力非常大，H_2 具有金属属性。

如果把地球作为一颗行星来看待，其冰冻圈的演

chinaXiv:202303.08899v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.08999v1

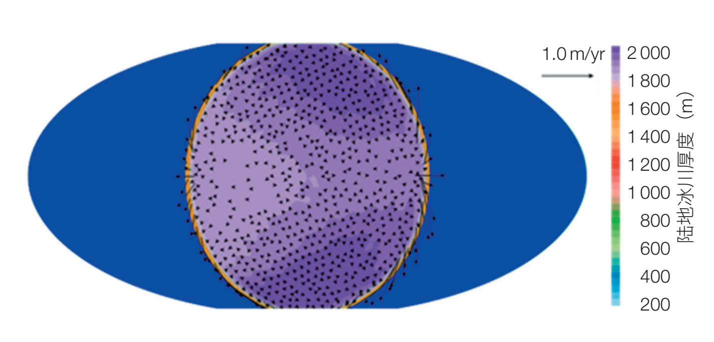


图 6　潮汐锁相行星背阳面陆地冰川厚度[20]

化历史不仅是我们认识其他行星冰冻圈的基础，也对理解地球水分的来源有重要意义。地球的水分是其形成之初就具有的，还是后期小行星带中星体撞击地球带来的？目前，我们对这一根本问题还没有答案。未来的小行星探测，尤其是氢同位素测量有可能回答这一基础问题。地球历史上 2 次“冰雪地球”事件的形成机理及相关的科学问题仍然是地球科学领域的一个研究热点。这些基础性问题是我们认识行星地球宜居性的根本。

行星冰冻圈丰富的多样性将极大地加深我们对冰冻圈的理解。例如，火星两极不仅存在水冰，还存在干冰；火星的次表层是否存在冻土和液态水是未来火星探测的目标之一。太阳系雪线之外众多矮行星和卫星均拥有丰富的水分，以水冰的形式存在，并构成这些星体的壳层。除此之外，其他易挥发组分如 CH_4、N_2、CO 也以固体形式存在，形成了与地球冰冻圈完全不同的行星冰冻圈。

深空探测是行星冰冻圈研究的主要手段。未来的深空探测，也将包括对行星冰冻圈的探测。在过去的 20 年，飞往土星系统的“卡西尼-惠更斯号”探测器和木星系统的“伽利略号”探测器为我们提供了许多关于冰卫星的观测数据。“信使号”探测器对水星的观测、“新视野号”探测器对冥王星及其卫星的观测、“黎明号”探测器对谷神星的观测，以及“罗塞塔号”探测器对“菲莱”彗星的探测，为研究太阳系冰冻圈提供了宝贵数据。我国的“嫦娥”系列探月卫星对月球的探测，也极大地丰富了我们对月球冰冻圈的知识。目前，正在木星轨道的“朱诺号”探测器和将在未来 10 年内发射的“Europa Clipper”“JUICE”探测器将对木星的卫星进行更多维度的密集观测，有望确定木星卫星冰层的厚度、成分和流变性质，并对冰壳层下是否存在液态海洋进行更准确的估计。这些探测计划为了解太阳系冰冻圈和探测地外生命的存在具有至关重要的意义。

太阳系外宜居行星冰冻圈是系外行星宜居性研究的一个热点。目前，所发现的可能宜居行星绝大多数是潮汐锁相行星，其背阳面冰冻圈发育的强弱直接影响到朝阳面是否有液态水存在，也影响到这些行星的宜居性。下一代太空望远镜也将观测宜居行星的冰冻圈，我们期待着更多激动人心的科学发现的到来。

参考文献

1 秦大河. 冰冻圈科学概论. 北京: 科学出版社, 2020.

2 胡永云. 行星冰冻圈. 北京: 科学出版社, 2020.

3 胡永云, 闻新宇. 冰雪地球的研究进展综述. 地球科学进展, 2005, 20: 1226-1233.

4 胡永云, 田丰. 前寒武纪气候演变中的几个重要科学问题. 气候变化研究进展, 2015, 11(1): 44-53.

5 胡永云, 田丰. 太阳系行星// 陆埮, 编. 现代天体物理学. 北京: 北京大学出版社, 2013.

6 Grasset O, Castillo-Rogez J, Guillot T, et al. Water and volatiles in the Outer Solar System. Space Science Reviews, 2017, 212(1): 835-875.

7 Spudis P D, Bussey D B J, Baloga S M, et al. Evidence for water ice on the Moon: Results for anomalous polar craters from the LRO Mini-RF imaging radar. Journal of Geophysical Research: Planets, 2013, 118(10): 2016-2029.

8 Lawrence D J, Feldman W C, Goldsten J O, et al. Evidence for Water Ice near Mercury's North Pole from MESSENGER neutron spectrometer measurements. Science, 2013, 339(6117):

ChinaXiv合作期刊

292-296.

9 Clifford S M, Fisher D A, Rice J W. Introduction to the Mars Polar Science Special Issue: Exploration platforms, technologies, and potential future missions. Icarus, 2000, 144(2): 205-209.

10 Ruesch O, Platz T, Schenk P, et al. Cryovolcanism on Ceres. Science, 2016, 353(6303): aaf4286.

11 Anderson J, Lau E, Sjogren W, et al. Europa's differentiated internal structure: Inferences from two Galileo encounters. Science, 1997, 276: 1236-1239.

12 Spencer J R, Nimmo F. Enceladus: An active ice world in the Saturn system. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2013, 41: 693-717.

13 Stofan E R, Elachi C, Lunine J I, et al. The lakes of Titan. Nature, 2007, 445: 61.

14 Lunine J I, Atreya S K. The methane cycle on Titan. Nature Geoscience, 2008, 1: 159.

15 Brown M E. The compositions of Kuiper Belt Objects. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2012, 40(1): 467-494.

16 Stern S A, Bagenal F, Ennico K, et al. The Pluto system: Initial results from its exploration by New Horizons. Science, 2015, 350: aad1815.

17 Wei Q, Hu Y, Liu Y, et al. Young surface of Pluto's Sputnik Planitia caused by viscous relaxation. The Astrophysical Journal Letters, 2018, 856(1): L14.

18 胡永云. 关于太阳系外行星的宜居性. 气象科技进展, 2015, 11(1): 44-53.

19 Hu Y, Yang J. Role of ocean heat transport in climates of tidally locked exoplanets around M-dwarf Stars. PNAS, 2014, 111: 629-634.

20 Yang J, Liu Y, Hu Y, et al. Water trapping on tidally locked terrestrial planets requires special conditions. Astrophysical Journal Letters, 2014, 796: L22.

Ice World Beyond Earth—Brief Introduction to Planetary Cryosphere

HU Yongyun* YANG Jun WEI Qiang

(Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract In the present paper, we briefly introduce the planetary cryosphere of solar planets and exoplanets. Planets and satellites in the solar system have very different surface temperatures. Therefore, they have very different cryosphere. Mercury and the Moon likely have water ice in the permanent dark areas of craters in polar regions. Venus is too hot to have a cryosphere. Mars has permanent polar ice caps that include both water ice and carbon-dioxide dry ice. Beyond the snowline of the solar system, there are many dwarf planets and satellites that are mainly consisted of water ice. With extremely low temperatures, water ice becomes even harder than the rocks on Earth and is actually the shell layer of these satellites and dwarf planets. In addition to water ice, other gases over Earth, such as CO_2, CH_4, N_2, CO, and so on, are condensed to solid states under conditions of extremely low temperatures. They form different cryosphere from water ice. Therefore, planetary cryosphere is very different from that on Earth, and they have plenty divergences. Studies on planetary cryosphere would largely broaden our understanding on Earth's cryosphere and benefit our understanding of the formation of the solar system, origin of water on Earth, evolution of life and climate environment on Earth, and extra-solar life detection in future.

Keywords cryosphere, solar planets, exoplanets, planetary sciences, climate

* Corresponding author

chinaXiv:202303.08999v1

ChinaXiv合作期刊



胡永云 北京大学物理学院大气与海洋科学系教授。1986年获中山大学学士学位，1996年获美国德州农工大学硕士学位，2000年获芝加哥大学博士学位，2000—2004年在华盛顿大学和哥伦比亚大学做博士后。中国气象学会副理事长，国内外多个学术期刊编委。曾担任北京大学物理学院大气与海洋科学系系主任和副院长。主要研究领域包括：现代气候、地球深时气候和行星气候及行星宜居性研究。E-mail: yyhu@pku.edu.cn

HU Yongyun Received B.S. degree from Sun Yat-Sen University of Atmospheric Sciences in 1986, M.S. degree from Texas A&M University in 1996, and Ph.D. degree from the University of Chicago in 2000. Yongyun Hu did his postdoctor at University of Washington and Columbia University over 2000–2004 and has been a Professor at Peking University since 2004. He has been the Vice President of the Chinese Meteorological Society since 2010, and he had been the Chair of the Department of Atmospheric and Oceanic Sciences over 2010–2009 and Vice Dean of the School of Physics over 2015–2019. He currently serves as Editors of *Theoretical and Applied Climatology*, *Advances in Atmospheric Sciences*, and *Earth and Planetary Physics*, and Associate Editors of *Science Bulletin* and *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*. His current research interests include present-climate, deep-time paleoclimate, and planetary climate. E-mail: yyhu@pku.edu.cn

chinaXiv:202303.08999v1

■责任编辑：岳凌生